

山形大学紀要(工学)第17巻 第1号 昭和57年1月  
Bull. of Yamagata Univ., Eng., Vol. 17, No. 1, Jan. 1982

## 軟鋼のバウシंगा効果と加工硬化

(焼なまし材と粒状化材の比較)

武田 武信\*・那須 康雄\*・白鳥 英亮\*\*

\*工学部, 精密工学科 \*\*埼玉大学

(昭和56年7月29日受理)

### 1. 緒 言

金属材料のバウシंगा効果は塑性加工, 疲れ, 塑性座屈などと直接に関連しているために, 従来から多くの研究<sup>(1)</sup>が行われてきた。また詳細な解説<sup>(2)~(6)</sup>もなされている。

バウシंगा効果の微視的発生原因に対する考え方には二つの流れがある。すなわち, 転位の堆積による長範囲の逆応力を考えるもの<sup>(7)</sup>と, 林転位の不均一分布による転位の短範囲の相互作用を考えるもの<sup>(8), (9)</sup>とが提案されている。現在のところ, 何れの考え方が妥当であるかについては必ずしも明確でないが, 長範囲の逆応力から矛盾なく説明される結果が多いようである<sup>(5)</sup>。一方, バウシंगा効果は加工硬化と相ともなって起る現象であることから, バウシंगा効果を測定することにより, 時効硬化<sup>(10)~(12)</sup>および低サイクル疲れ<sup>(13)~(15)</sup>の硬化機構を解明しようとする試みがなされている。しかしこの場合にはバウシंगा効果の定量的評価が問題となる。

ところで, 炭素鋼ではパーライトの体積率が増すとバウシंगा効果は急激に大きくなる<sup>(2), (16)</sup>。一般に亜共析鋼の圧延材に焼なましを施すと, パーライトは結晶粒界近傍に析出し, かつ圧延軸に平行なバンド状に存在する(フェライトバンド組織)。このフェライトバンド組織が疲れの性質を支配し, 最終破損形態の異方性を誘起することはすでに報告した<sup>(17)</sup>。

本研究では, フェライトバンド組織がバウシंगा効果の発達におよぼす影響を, パーライトを粒状化してフェライト粒内に一様に分散した材料と焼なまし材のバウシंगा効果を測定し, とくに以下の2点に着目して調べた。すなわち, (1) 焼なまし材のバウシंगा効果が引張り一圧縮よりねじり一逆ねじりにおいて著しく現われること<sup>(18)</sup>に対して, 焼なまし材特有のフェライトバンド組織が影響しているか否かを調べた。(2) バウシंगा効果の測定から, 逆に硬化機構を解明しようとする従来の研究において, バウシंगा効果の定義に一貫性が見られない。遷移軟化量あるいは定常軟化量<sup>(19)</sup>の何れの測定値で評価すべきかを, 加工軟化機構が比較的単純な粒状化材で調べた。

### 2. 試験片および実験方法

素材は直径 25mm の圧延丸棒で, 化学成分を表1に, 焼なまし材の機械的性質を表2に示す。試験片の形状, 寸法を図1に示す。引張(圧縮)試験には油圧万能試験機を用い

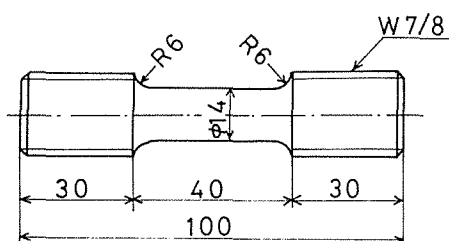
た。図1(a)の試験片に所定の引張予ひずみを加えた後、平行部の長さや直径の比がほぼ2となるように切断し、試験片端面を仕上げた後、圧縮試験を行った。圧縮に際しては試験片端面と圧盤の間をテフロンシートと二硫化モリブデンで潤滑し、摩擦を軽減した。軸ひずみは試験片に直接取り付け精度  $1\mu\text{m}$  のスナップゲージで直径変化を測定することにより求めた。ねじり試験は振り型ねじり試験機で行った。せん断ひずみは試験片標点に取り付けた一対の鏡の回転をスケールと望遠鏡で検出することにより測定した。

Table 1 Chemical composition (%)

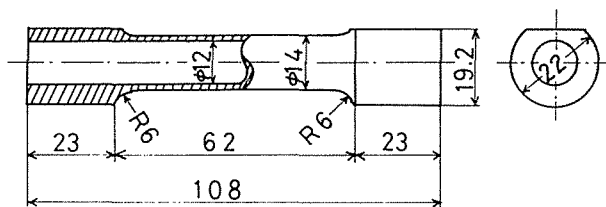
C	Si	Mn	P	S	Nb	N	Al	Fe
0.24	0.23	0.49	0.022	0.017	0.029	0.0031	0.002	Re

Table 2 Mechanical properties of specimen annealed at  $910^{\circ}\text{C}$  for 1 hr

Lower Yield Point		Tensile Strength $\sigma_B$ kg/mm <sup>2</sup>	True Strength $\sigma_T$ kg/mm <sup>2</sup>	Elongation $\phi$ %	Reduction of Area $\varphi$ %
Tension $\sigma_{st}$ kg/mm <sup>2</sup>	Torsion $\tau_{st}$ kg/mm <sup>2</sup>				
27.6	14.3	46.4	85.8	35.8	59.6



(a) Tensile Specimen



(b) Torsional Specimen

Fig. 1 Dimensions of specimens

### 3. 熱処理と組織

図2に焼なまし材の横断面および縦断面の組織と結晶粒径を示す。亜共析鋼をオーステナイト域から徐冷すると必ずこのようなフェライトバンド組織を呈する。

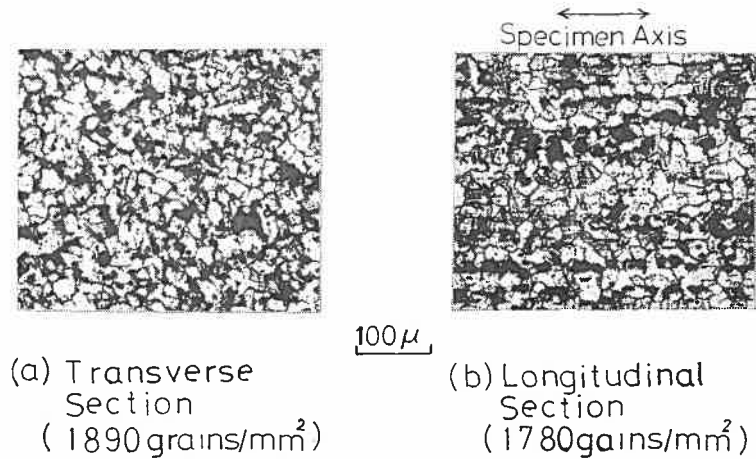


Fig. 2 Grain sizes and microstructures of annealed specimen

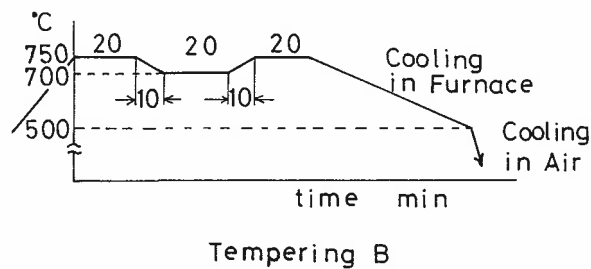
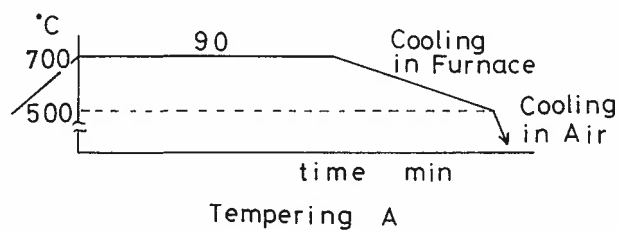
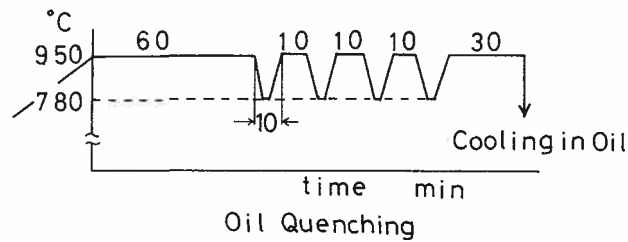


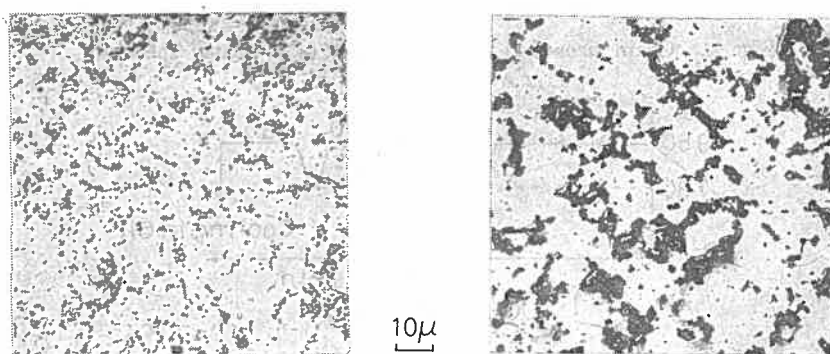
Fig. 3 Heat treatment (Tempering)

図3に焼戻しの方法を示す。最初、試験片を真空電気炉中に 950°C 1時間加熱保持し、950°C と 780°C の間を上下し、最後に 950°C に 30 分間保持後、すばやく常温の油中に焼入れた。このような方法で熱処理を行うと、初析フェライトがほとんど析出することなしに Ar' および Ar' 変態が起る。続いて、以下の2種類の方法で焼戻しを行った。

(1) 700°C に 90 分間加熱保持後、500°C まで炉冷し、常温の空气中に放冷

(2) 750°C と 700°C の間、すなわち A<sub>1</sub> 変態点の直上、直下で加熱を繰返してから冷却

(1), (2) の焼戻しにより得られた組織を図4に示す。図4(a)では、微細なセメントタイト粒子がフェライト粒内にはば一様に分散している。図4(b)では、結晶粒界に形成された塊状のパーライトと粒内に分散したセメントタイト粒子の混在組織となっている。これらの焼戻し組織は試験片の縦断面と横断面でほとんど同一の組織を呈し、フェライトバンド組織は完全に消失している。なお図4(a)および(b)の組織を有する試験片をそれぞれ焼戻しA材および焼戻しB材と呼ぶことにする。表3はセメントタイト（パーライト）の分散度を定量的に表わしたものである。組織写真より、点算法で粒子数を測定し、Kellyら<sup>(30)</sup>の方法によって粒子間距離を算出している。



(a) Tempered A

(b) Tempered B

Fig. 4 Microstructures of tempered specimens

Table 3 Dispersion Parameters of cementites or pearlites

Material		Volme Fraction of Cementite	Mean Diameter $\mu\text{m}$	ShapeFactor $(\text{Minor Axis})/(\text{Major Axis})$	Interparticle Spacing $\mu\text{m}$
Tempered A		0.036	1.3	0.5~1.0	3.8
Tempered B	Granular	0.011	1.0	0.4~0.8	10.5
	Massive	0.025	6.6	0.2~0.6	24.7
Annealed		0.036	6.4 (Transverse Section)	0.1~0.4 (Longitudinal Section)	19.2 (Transverse Section)

#### 4. 実験結果および考察

図5に焼戻しA材，焼戻しB材，焼なまし材および工業用純鉄（0.012%C）の応力—ひずみ曲線を示す。なお応力—ひずみ曲線はミーゼス形の相当応力，相当ひずみ関係  $[\sigma] = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$ ， $\rho = \int \sqrt{(d\epsilon^p)^2 + (d\gamma^p)^2}/3$ ， $\sigma$ ：軸応力， $\tau$ ：せん断応力， $d\epsilon^p$ ：軸塑性ひずみの増分， $d\gamma^p$ ：工学的せん断塑性ひずみの増分]を用いている。各材料の降伏点伸び終了点から  $\rho \approx 6\%$  までの応力—ひずみ曲線は単純なべき関数  $[\sigma] = F\rho^n$ （ $F$ ：塑性係数， $n$ ：加工硬化指数）でよく近似できる。表4に各材料の  $F$  および  $n$  の値を示す。焼戻しA材は焼なまし材と比較して降伏点が高く，加工硬化率  $(d[\sigma]/d\rho)$  が低い。一方，焼戻しB材は焼なまし材よりも降伏点がわずかに高いが，降伏点伸び終了後の流動応力はわずかに低い。また焼戻しB材の加工硬化率は焼戻しA材と焼なまし材の中間の値をとる。図

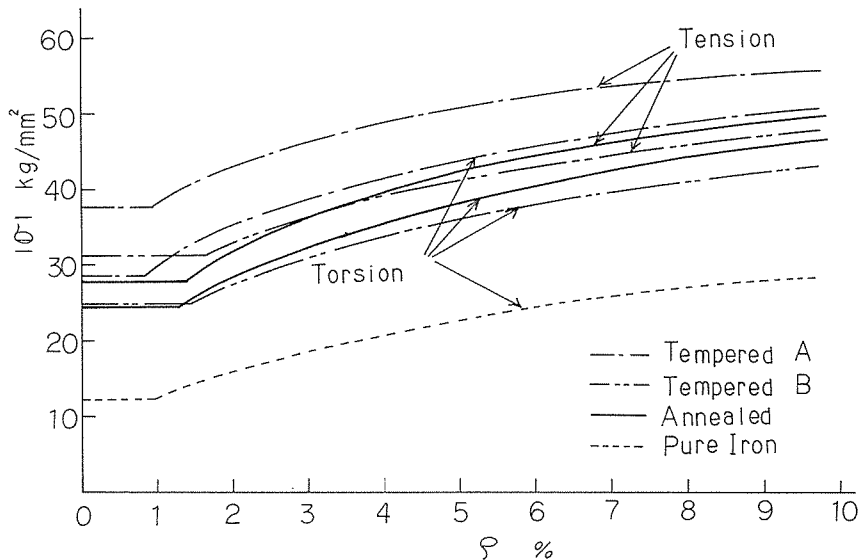


Fig. 5 Stress-strain curves

Table 4 Values of plastic coefficient  $F$  and work hardening exponent  $n$

Material		$F$ kg/mm <sup>2</sup>	$n$
Tempered A	Tension	86.6	0.17
	Torsion	86.0	0.22
Tempered B	Tension	86.9	0.24
	Torsion	86.2	0.28
Annealed	Tension	99.6	0.28
	Torsion	99.8	0.31
Pure Iron	Torsion	68.5	0.36

6で降伏点伸び終了点における接線（加工硬化率 $\alpha$ 、 $\alpha_0$ ）の延長線と弾性線との交点の応力を $\sigma_{i0}$ 、 $\sigma_i$ とし、純鉄の加工硬化量を $\Delta\sigma_0$ 、焼戻し材あるいは焼なまし材の加工硬化量を $\Delta\sigma$ とすると、 $\Delta\sigma_{CE} = \Delta\sigma - \Delta\sigma_0$ はセメンタイトが存在することによる加工硬化の増分を表わすことになる<sup>(2)</sup>。図7は焼戻しA材および焼なまし材について $\Delta\sigma_{CE}$ を求めたものである。加工硬化に対するセメンタイトの寄与が焼戻しA材の方が少ないことを示している。従って焼戻しA材の流動応力が高く現われることの原因は、微細なセメンタイト粒子の分散によってフェライト地が焼なまし材よりも強化されていることに依る。また焼戻しA材の加工硬化が低下する原因は、フェライトとセメンタイトの相境界が不明瞭（整合的）となるためまたセメンタイトが球形に近づき、フェライトとの境界面積が減少するため、焼なまし材の片状（層状）パーライトの場合よりも転位の堆積あるいは捕捉が起

$$\Delta\sigma_{CE} = \Delta\sigma - \Delta\sigma_0$$

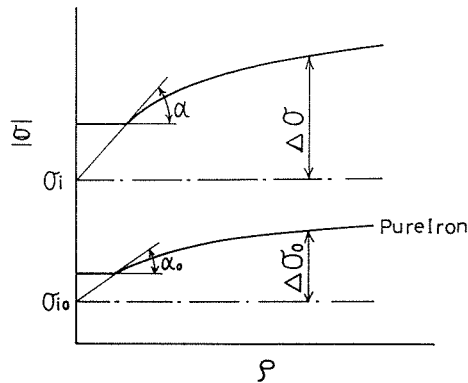


Fig. 6 Determination of  $\Delta\sigma_{CE}$

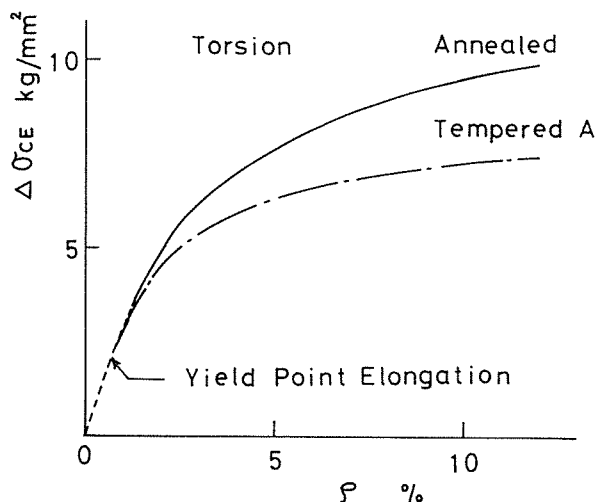


Fig. 7  $\Delta\sigma_{CE} - \rho$  curves

難しいことに依るものと考えられる。

バウシンガ効果を定量的に表示するにあたっては Milligan ら<sup>(21)</sup>の方法に従った。すなわち図8に示すように、逆方向の応力  $\sigma_r$  を予応力  $\sigma_0$  で割って無次元化した値、 $\lambda = \sigma_r / \sigma_0$  (Bauschinger Effect Factor, 略して BEF) と除荷点からの塑性ひずみ  $\rho_2$  との関係から各材料のバウシンガ効果を比較した。図9および10に焼戻し材のバウシンガ曲線 ( $\lambda - \rho_2$  曲線) を示す。曲線は  $\rho_2$  の進行にともない、始め大きな曲率を示しながら上昇し、 $\rho_2 = 2\%$  程度ではほぼ一定の硬化率となる。始めの部分を遷移軟化領域、ほぼ一定の硬化率となる部分を定常軟化領域の始まりと見なすことができると思われる。図11は先に報告した<sup>(18)</sup> 焼なまし材の結果を BEF と予ひずみ  $\rho_0^*$  の関係で整理したものである。引張予ひずみの場合とねじり予ひずみの場合を比較すると、 $\rho_2$  の比較的小きなときには  $\lambda$  はねじり予ひずみの場合の方が小さく、 $\rho_2 = 2\%$  において  $\lambda_{0.2}$  はほとんど一致する。また  $\lambda$  におよぼす予ひずみの影響は  $\rho_0^* = 5\%$  程度で飽和する傾向を示す。 $\lambda_{0.2}$  を遷移軟化領域の代表値、 $\lambda_{2.0}$  を定常軟化領域の代表値として図12で焼戻し材と焼なまし材のバウシンガ効果を比較した。 $\lambda$  はいずれも焼戻し材の方が大きい。 $\lambda_{2.0}$  の変化を見ると、焼戻しA、B両材の結果はほとんど一致し、かつ引張予ひずみとねじり予ひずみによる相異は認められない。 $\lambda_{0.2}$  の変化については、やはり焼戻し材の場合に、引張予ひずみとねじり予ひずみによる有意差は認められないが、焼戻しB材の  $\lambda_{0.2}$  値は予ひずみが大きくなると、焼なまし材の  $\lambda_{0.2}$  値に一致する傾向を示す。焼戻しB材の  $\lambda_{0.2}$  値は予ひずみが小さい範囲では結晶粒内に存在するセメンタイト粒子によって影響され、予ひずみが大きくなると粒界に存在するパーライトによって影響されるものと考えられる。焼なまし材のバウシンガ効果が引張り一圧縮よりねじり一逆ねじりで著しく現われることについて、西谷ら<sup>(22), (23)</sup> は低サイクル疲れ試験を行ってすべり帯の発達に引張り一圧縮において早いことを観察し、引張りともねじりによるせん断応力の加わり方の違いから説明している。確かに本材料においてもすべり帯の発達の違いに関して同様な現象が観察された。すなわち図13は焼なまし材に予ひずみ  $\rho_0^* = 3.5\%$  を加えたときの電子顕微鏡写真である。引張予ひずみ材では粒界近傍にすべり帯が認められるが、ねじり予ひずみ材ではすべり帯が認められない。従って、ねじりの方がすべりの干渉が起りにくく、予ひずみ時に活動したすべり系と逆ねじりのときのすべり系とがほぼ等しく、転位の消滅などが起り易いものと思われる。しかしながら

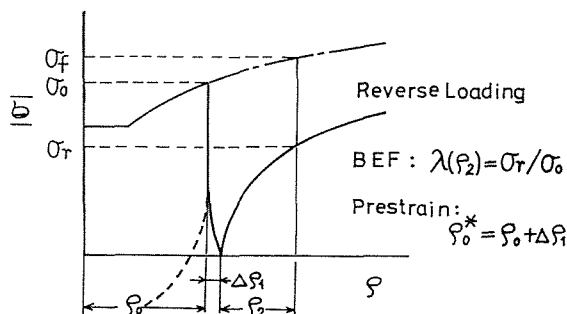


Fig. 8 Representation of the Bauschinger effect

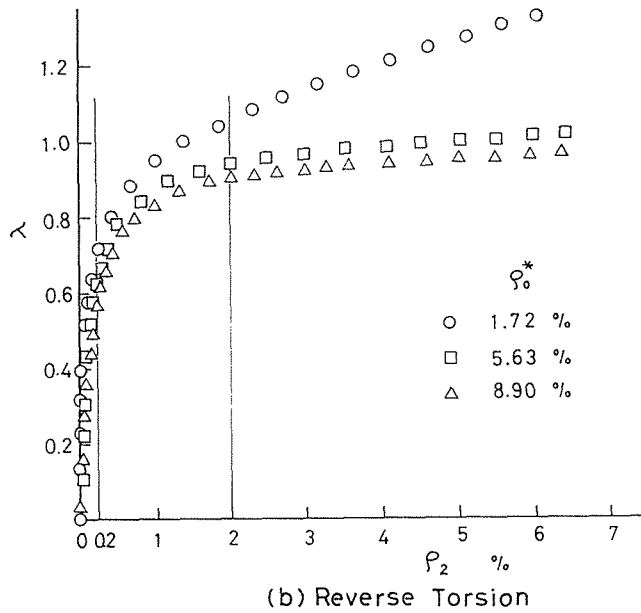
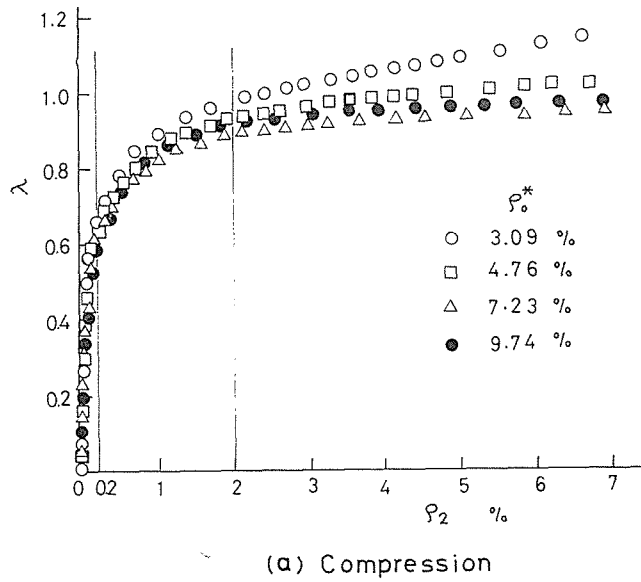


Fig. 9 Bauschinger curves (Tempered A)



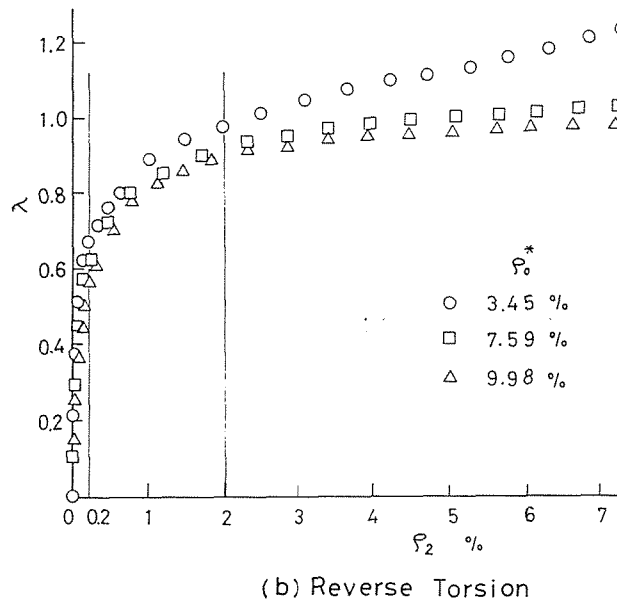
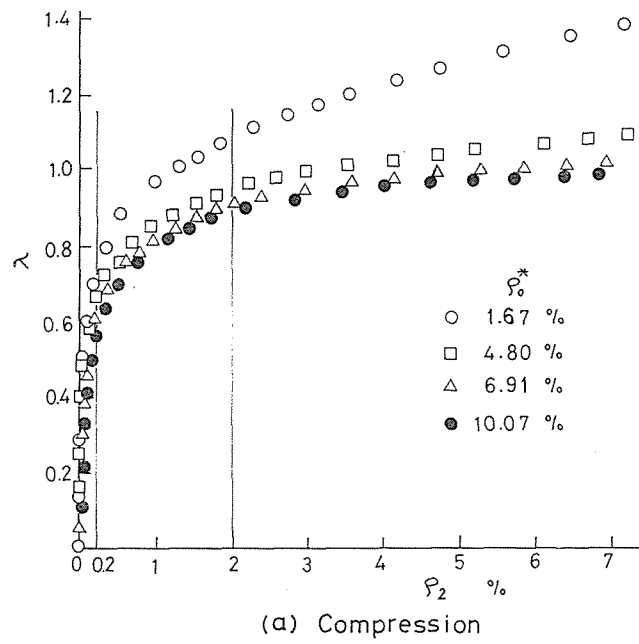


Fig. 10 Bauschinger curves (Tempered B)

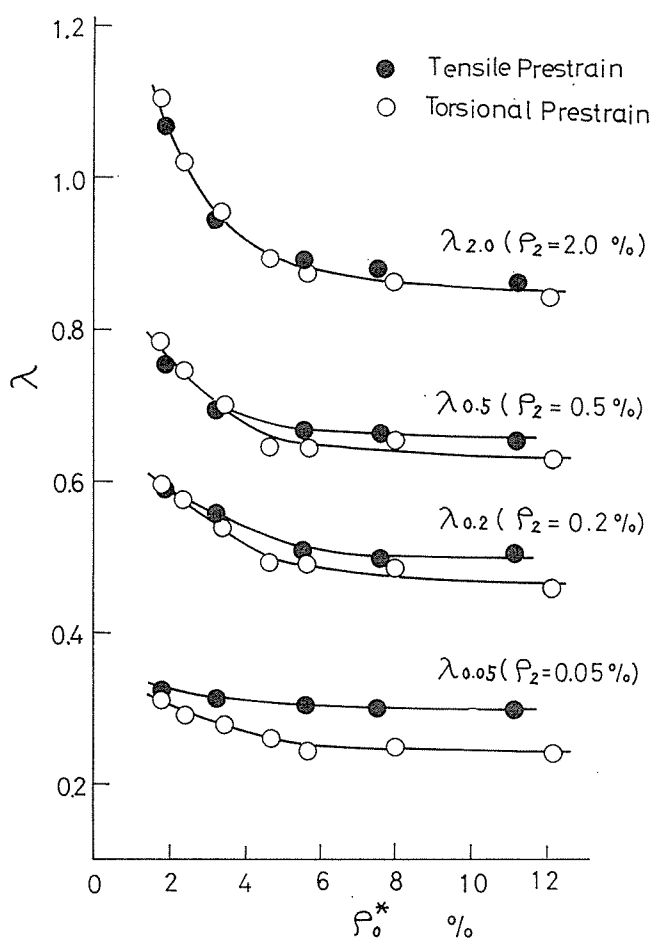


Fig. 11 Relation between prestrain and BEF (Annealed)

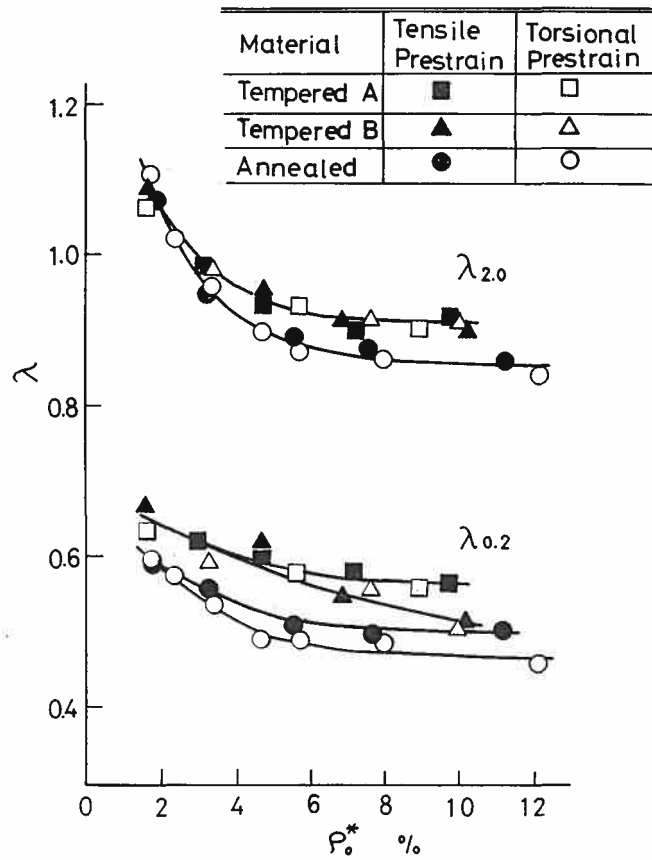


Fig. 12 Relation between prestrain and BEF ( $\lambda_{0.2}$ ,  $\lambda_{2.0}$ )  
(Comparison of annealed specimen with tempered one)

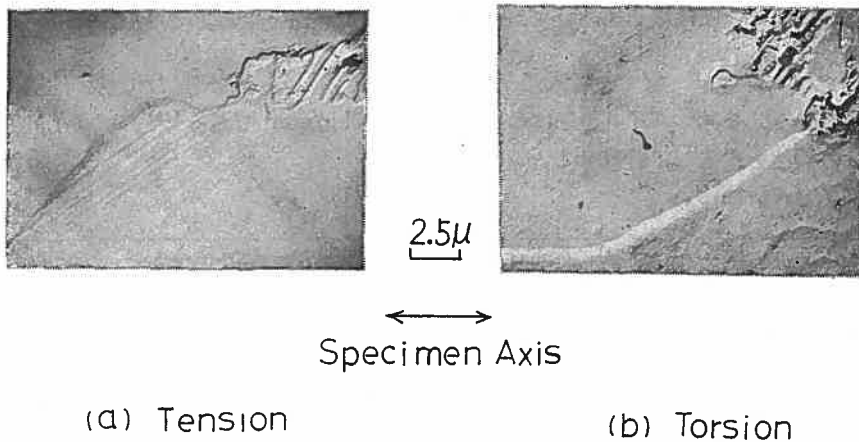


Fig. 13 Slip patterns of prestrained specimens (Annealed,  $\rho_o^*=3.5\%$ )

図12の結果はバウシニング効果の発達に対して焼なまし材特有のフェライトバンド組織も影響していることを示すものと考えられる。

## 5. Fisher-Hart-Pry の理論の適用

本来、同一の第2相粒子の体積率を有する材料においては、粒子の分散が細かいほど加工硬化は大きいはずである。しかし焼なまし材と焼戻し材の結果は逆の傾向を示した。この原因については前節で考察したが、結局のところ両材料の加工硬化機構が異なることを示すものである。

軟鋼の焼なまし材においてはフェライトの積層欠陥エネルギーが大きいため、クロススリップが生じ易いが、パーライトの体積率が増すと急激に加工硬化する<sup>(2) (3)</sup>。加工硬化機構は結晶粒界とパーライト体積率に支配され、必ずしも一様でない。一方、粒状化材の加工硬化機構はほとんど結晶粒内に分散した粒子によって支配されられる<sup>(24)</sup>、<sup>(25)</sup>。焼戻しA材の実験結果に対して、Fisher ら<sup>(26)</sup>の理論を適用し、加工硬化とバウシニング効果との相関性について検討した\*。なお、比較のために焼なまし材の結果に対して理論の適用を試みた。

Fisher らは粒子のまわりに転位環が形成されるとき、それらが一つのフランクリード源に作用する逆応力 $\tau_h$ を計算し、次式を導いた。

$$\tau_h = 3f^{2/3} NGb/r \quad (1)$$

ここで

$f$  : 粒子の体積率,  $N$  : 転位環の数,

$G$  : 剛性率 (フェライト,  $8100\text{kg/mm}^2$ ),

$b$  : バーガースベクトル (フェライトの格子定数,  $2.87\text{\AA}$ )

$r$  : 平面上の平均粒子半径

式(1)で  $NGb/r$  は転位環が粒子に作用する応力と考えられ、これがある臨界値たとえば粒子を変形するに必要な応力  $F$  に達すると、最も内側の転位環は粒子を変形して消滅し、外側に新たな転位環が加わって  $N$  の値はそれ以後一定となる。その条件は

$$N \leq rF/(Gb) \quad (2)$$

で与えられる。セメンタイト粒子については  $F \simeq 100\text{kg/mm}^2$  である<sup>(29)</sup>。式(1), (2)に表3の数値を代入し、計算すると、

焼戻しA材について

---

※田中一森<sup>(27)</sup> および Brown—Stobbs<sup>(28)</sup> により新たな加工硬化理論が提案されているが、本研究では加工硬化の飽和を問題とし、Wilson<sup>(25)</sup> がX線測定から求めた実験式  $\tau_B = 2\tau_x$  [ $\tau_B$  : バウシニング応力,  $\tau_x$  : 平均の内部応力 (逆応力)] の妥当性について言及するために Fisher らの理論を適用した。焼戻しA材の場合の  $N$  値 (転位環の数) を田中一森および Brown—Stobbs の理論で計算すると、Fisher らの理論で計算した値の約  $1/2$  および約  $1/5$  となる。焼戻しA材の粒子直径は  $1.3\text{ }\mu\text{m}$  と大きいので、変形の初期から塑性緩和が起ると考えられる。従って図14 (b) に示す  $N$  値は塑性緩和によるすべりも転位環として換算したときの値と解釈すべきであろう。

$$N = \tau_h / 0.065, N \leq 32 \quad (3)$$

焼なまし材について

$$N = \tau_h / 0.013, N \leq 160 \quad (4)$$

となる。次に  $\tau_h$  に対して、以下の二つの仮定をおいて  $N$  を計算してみる。第1の仮定はセメントタイトが存在することによる加工硬化の増分が全て逆応力に寄与するとした場合、すなわち

$$\tau_h = \Delta\sigma_{CE} / \sqrt{3} \quad (5)$$

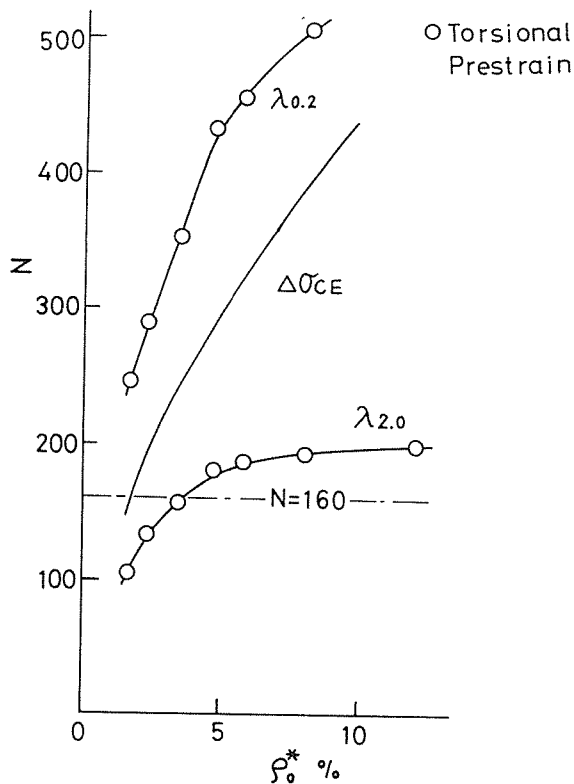
第2の仮定は Abel ら<sup>(30)</sup> および五弓ら<sup>(2)</sup>の方法に従い、正逆方向の流動応力を形式的に

$$\left. \begin{aligned} \sigma_f &= \sigma_i + \sigma_b \\ \sigma_r &= \sigma_i - \sigma_b \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

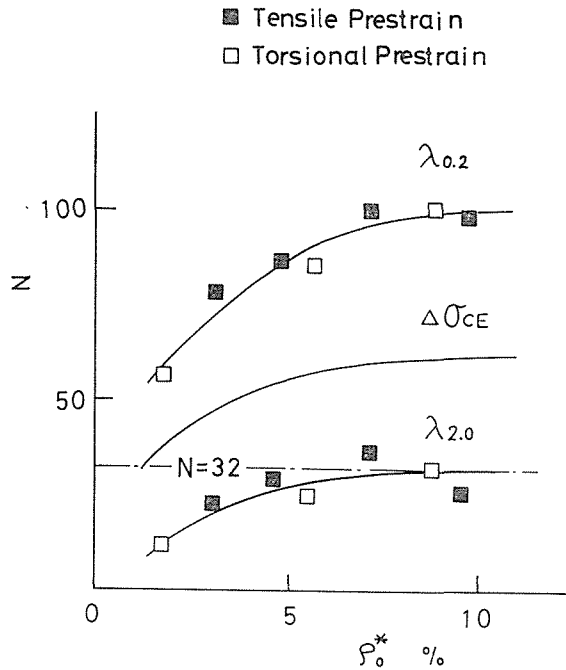
ここで

$\sigma_i$  : 方向性のない内部応力,  $\sigma_b$  : 方向性のある内部応力と表わし (図8参照),  $\sigma_b$  が  $\tau_h$  に対応するとした場合、すなわち

$$\tau_h = \sigma_b / \sqrt{3} = (\sigma_0 / 2\sqrt{3}) (\sigma_f / \sigma_0 - \lambda) \quad (7)$$



(a) Annealed



(b) Tempered A

Fig. 14 Relation between prestrain and the number of dislocation loop

式(7)では、 $\lambda$ に対して $\lambda_{0.2}$ および $\lambda_{2.0}$ を適用する。図14に計算結果を示す。図14において、式(3)、(4)の条件により $N$ が1点鎖線以上の値をとると、セメント粒子が変形することを表わしている。図14(a)では、 $\Delta\sigma_{CE}$ および $\lambda_{0.2}$ の値からは $N$ を相当に大きく、また $\lambda_{2.0}$ の値からは予ひずみが大きくなるとわずかに大きく見積る傾向にある。恐らく焼なまし材の加工硬化の飽和が多重すべり等の原因によって起るためと考えられる。一方図14(b)では、 $\Delta\sigma_{CE}$ および $\lambda_{0.2}$ によっては $N$ を過大に見積るが、 $\lambda_{2.0}$ から求めた $N$ の変化は予ひずみが大きくなると $N=32$ に漸近する。このことは加工硬化の飽和がセメント粒子の変形によって起ると仮定した場合の理論値と対応し、定常軟化領域のバウシガ効果と加工硬化の間に定量的な相関性があることを示すものである。しかし高炭素鋼では遷移軟化領域のバウシガ効果と加工硬化に相関性があるとする報告<sup>(31)</sup>もなされているので、この種の問題を議論する場合には第2相粒子の体積率を考慮する必要があると思われる。

## 6. 結 論

パーライトを粒状化した材料と焼なまし材のバウシガ効果を測定し、比較検討を行って次の結論が得られた。

(1) パーライトを粒状化した組織を有する材料は焼なまし材と比較してバウシガ効果が小さい。また引張り—圧縮、ねじり—逆ねじりで測定したバウシガ効果に相異が見

られない。

(2) 焼なまし材において、遷移軟化領域のバウシング効果が引張り一圧縮よりもねじり一逆ねじりで著しく現われることに対して、焼なまし材特有のフェライトバンド組織が影響していると考えられる。

(3) 粒状セメントタイトと塊状のパーライトの混在組織を有する材料の遷移軟化領域のバウシング効果挙動は予ひずみが比較的小さな範囲では粒状化材の場合と同様な挙動を示すが、予ひずみが大きくなると焼なまし材のバウシング効果挙動と一致する傾向を示す。

(4) 軟鋼の粒状化材では定常軟化領域のバウシング効果と加工硬化の間に定量的な相関性がある。

有益なご討論を賜った東京工業大学森勉教授、本学熊倉重典名誉教授並びに松浦圭助教授に感謝の意を表します。また菊地新一技官には実験を補助していただいた。使用した材料は川崎製鉄株式会社から提供されたものである。記して謝意を表します。

## 文 献

- (1) 例えば、シンポジウム予稿「バウシング効果によって生ずる実用上の問題点」, (1971), 金属学会.
- (2) 五弓・岸, 塑性と加工, **10**—107 (昭44—12), p. 863.
- (3) 岸, 機誌, **75**—639 (昭47—4), p. 61.
- (4) Wilson, D. V., Metals Tech., (1975—1), p. 8.
- (5) 長谷川, 金会報, **15**—8 (昭51), p. 509.
- (6) Sowerby, B. et al., Mat. Sci. Eng., **41** (1979), p. 43.
- (7) Seeger, A., Dislocations and Mechanical Properties of Crystals, J. Wiley (1957), p. 243.
- (8) Hirsch, P. B., 同上, p. 92
- (9) Saada, G., Acta Met., **8** (1960), p. 841.
- (10) Svensson, N. L., Nature, **211** (1966), p. 290.
- (11) Wilson, D. V. and Ogram, G. R., JISI, (1968—9), p. 911.
- (12) Williams, D. N., Met. Trans., **11** A (1980—9), p. 1629.
- (13) Sleswyk, A. W. et al., Acta Met., **26** (1978), p. 1265.
- (14) Saleh, Y. and Margolin, H., 同上, **27** (1979), p. 535.
- (15) Sasaki, S. and Ochi, Y., Proc. 23rd. Japan Congr. Mater. Res., (1980), p. 27.
- (16) 熊倉, 機誌, **70**—584 (昭42—9), p. 39.
- (17) Takeda, T. et al., Proc. 21st. Japan Congr. Mater. Res., (1978), p. 45.
- (18) 武田ほか4名, 機論, **47**—418 (昭56—6), p. 665.
- (19) 例えば, Kumakura, S., Onuki, A. and Takeda, T., Proc. 16th. Japan Congr. Mater. Res., (1973), p. 13.
- (20) Kelly, A and Nicholson, R. B., Strengthening Methods in Crystals, Elsevier (1971), p. 34.
- (21) Milligan, R. V. et al., Trans. ASME, Ser. D, **88**—2 (1966—4), p. 480.

- (22) 西谷ほか2名, 機械の研究, **24**—10 (昭47), p. 42.
- (23) 西谷・森田, 機論, **39**—322 (昭48—6), p. 711.
- (24) Wilson, D. V. and Konnan, Y. A., Acta Met., **12** (1964—5), p. 617.
- (25) Wilson, D. V., 同上, **13** (1965—7), p. 807.
- (26) Fisher, J. C., Hart, E. W. and Pry, R. H., 同上, **1** (1953—5), p. 336.
- (27) Tanaka, K. and Mori, T., 同上, **18** (1970—8), p. 931.
- (28) Brown, L. M. and Stobbs, W. M., Phil. Mag., **23**—185 (1971—5), p. 1185.
- (29) Dewey, M. A. P. and Briers, G. W., JISI, **204** (1966—2), p. 102.
- (30) Abel, A. and Ham, R. K., Acta Met., **14** (1966—11), p. 1489.
- (31) Kishi, T. and Gokyu, I., Trans. Iron and Steel Inst. Japan, **11** (1971), p. 1044.



## The Bauschinger Effect and Work Hardening in a Mild Steel

(Comparison of an Annealed Material with a  
Spheroidized Material)

Takenobu TAKEDA\*, Yasuo NASU\* and Eiryo  
SHIRATORI\*\*

*\*Department of Precision Engineering, Faculty of Engineering*

*\*\*Saitama University*

For the purpose of examining of the effect of microstructure on the Bauschinger effect and the relation between the Bauschinger effect and the work hardening, experiments were carried out on a mild steel in tension-compression and reverse torsion tests.

The annealed steel is composed of the alternate layers of ferrites and pearlites along the rolling axis, which is called the ferrite band structure. The pearlites of specimen are spheroidized and dispersed uniformly in the ferrite matrix by tempering. The influence of the distribution of second phase particles on the development of the Bauschinger effect was examined on comparing the reverse loading curves of the annealed and the spheroidized. The transient softening of the Bauschinger effect in the annealed steel is larger in reverse torsion than in tension-compression. On the other hand, the Bauschinger effect in the spheroidized steel is much the same in both cases. Hence the ferrite band structure has an effect on the development of the Bauschinger effect.

As it can be considered that the work hardening of spheroidized steel depends on the dispersed cementites, the dispersion hardening theory proposed by Fisher et al. applies to the experimental results and the quantitative relation between the Bauschinger effect and the work hardening is obtained. It was shown that the permanent softening of the Bauschinger effect corresponds to the work hardening.